

矩形波导 CO₂ 激光器谐振腔耦合效率研究

李 辉^{1,2}, 冯继东³, 谭荣清^{1,2}, 张阔海¹, 李志永¹, 马 芳^{1,2}

¹中国科学院电子学研究所高功率气体激光技术部, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国电子科技集团公司第五十三研究所, 天津 300308

摘要 为了实现波导 CO₂ 激光调 Q 脉冲输出, 需要搭建半外腔激光器以在谐振腔内插入 Q 开关。实验研究了波导纵横比 $m=2$ 的半外腔矩形波导 CO₂ 激光器的输出功率与谐振腔光学结构参数之间的关系, 对比了平面反射镜紧贴波导口激光器的输出功率, 得到谐振腔模式耦合进入波导口的损耗与谐振腔全反镜曲率半径 R 以及全反射镜至波导口的距离 d 的关系。基于菲涅耳衍射积分理论, 采用变步长辛普森算法理论计算了 $m=2$ 的矩形波导谐振腔耦合效率与 R 、 d 之间的关系。基于实验及理论结果, 得到了适合高纵横比矩形波导 CO₂ 激光器半外腔搭建的两个耦合效率较高的谐振腔光学及结构参数: $d=10$ mm、 $d=R$ 的位置, 并且 R 越大这两个位置对应的耦合效率越高。

关键词 激光器; CO₂ 激光器; 矩形波导; 谐振腔; 耦合效率

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701003

Coupling Efficiency of CO₂ Laser Resonator with Rectangular Waveguide

Li Hui^{1,2}, Feng Jidong³, Tan Rongqing^{1,2}, Zhang Kuohai¹, Li Zhiyong¹, Ma Fang^{1,2}

¹Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³The 53th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300308, China

Abstract In order to achieve Q-switched pulse output of the CO₂ waveguide laser, a half-external cavity laser is necessary to insert the Q switch in the resonator. We study the relationship between the output power of the rectangular waveguide half-external cavity CO₂ laser with the waveguide aspect ratio $m=2$ and the optical structural parameters of the resonator. We compare the output powers of the laser whose waveguide port clings to the plane mirror, and obtain the relationship between the loss generated by the resonant cavity mode coupling to the waveguide port and the radius of the total reflection mirror R , and the distance between the total reflection mirror and the waveguide port d . Based on the Fresnel diffraction integral theory, the relationship between the coupling efficiency of the resonator and R , d when $m=2$ is calculated with the Simpson algorithm variable step length theory. The results show that $d=R$ and $d=10$ mm are two optical and structural parameters which are suitable for the rectangular waveguide half-external cavity CO₂ laser with a high aspect ratio, where larger R will induce higher coupling efficiency.

Key words lasers; CO₂ lasers; rectangular waveguide; resonator; coupling efficiency

OCIS codes 140.3470; 140.3070; 140.3540

1 引言

CO₂ 激光器可产生波长范围为 9~11 μm 的激光输出, 该波段处于光束传输的大气窗口, 在激光测距、

收稿日期: 2017-03-07; 收到修改稿日期: 2017-03-27

作者简介: 李 辉(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事射频波导 CO₂ 激光器调 Q 方面的研究。

E-mail: lihui114@hotmail.com

导师简介: 谭荣清(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事气体激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: rongqingtan@163.com(通信联系人)

激光雷达、环境监测等多个领域都具有很好的应用前景^[1-2]。射频波导 CO₂ 激光器具有工作电压低、无需气体流动、可扩散冷却、结构紧凑等优点,是一种很好的 CO₂ 激光光源^[3-5]。近年来随着激光测距、激光雷达、环境探测等领域对短脉冲高功率 CO₂ 激光器需求的不断增长,使得射频波导 CO₂ 激光器调 Q 研究有着重要的价值,特别是对矩形波导 CO₂ 激光器调 Q 技术的研究。

要实现调 Q 首先需要搭建半外腔激光器以在谐振腔内插入 Q 开关,射频波导 CO₂ 激光器由于其特殊的波导结构,一般要求谐振腔镜尽可能紧贴波导口,否则谐振腔模在耦合进入波导时会存在较大的损耗^[6]。为解决此问题,已报道的射频波导 CO₂ 激光器调 Q 实验研究中均采用波导纵横比 $m=1$ 的方形波导腔,并将焦距 f 等于基模高斯光束共焦参数的透镜放置在 $d=f$ (d 为全反镜距波导口的距离)的位置。该方法虽然可以比较容易获得低损耗谐振腔,但由于电极间距以及方形结构的限制,只能通过增加电极长度来增大放电区面积,要实现大功率激光输出,需要采用机械结构复杂的折叠腔。当采用简单的直线型谐振腔时,一般输出平均功率较低。Marcus 等^[7]在谐振腔放电宽度为 2 mm 的情况下获得了平均功率为 0.5 W 的脉冲激光输出,王琪等^[8]在谐振腔放电宽度为 2.25 mm 的情况下获得了平均功率为 0.8 W 的脉冲激光输出,周鼎富等^[9]在谐振腔放电宽度为 2.5 mm 的情况下获得了平均功率为 2.2 W 脉冲激光输出。

为使波导 CO₂ 激光器获得更高的平均功率调 Q 输出,本文采用波导纵横比 $m=2$ 的矩形结构半外腔波导谐振腔,谐振腔放电宽度为 3 mm。实验研究了谐振腔全反镜曲率半径 R 和全反镜距波导口的距离 d 对矩形波导 CO₂ 激光器输出功率的影响,并对矩形波导谐振腔耦合效率与 R 、 d 的关系进行了理论模拟计算,得到了适合高纵横比的半外腔激光器结构参数。这为后续进行矩形波导激光器调 Q 产生高峰值功率激光输出研究提供了参考。

2 实验装置

实验所用射频波导 CO₂ 激光器波导口截面如图 1 所示,波导谐振腔由两块铝电极平行放置,夹着两块氧化铝陶瓷构成。波导口横向尺寸 $2a=1.5$ mm,纵向尺寸 $2b=m \times 2a$,其中 $m=2$,谐振腔长度 $L=343$ mm。实验装置如图 2 所示。激光腔体尾部采用透过率为 98%、厚度为 3 mm 的硒化锌窗口片密封以实现半外腔结构,输出端采用曲率半径 $R_{out}=15$ m、反射率为 85% 的硒化锌透镜密封及耦合输出激光,窗口片及耦合输出镜均紧贴波导口安装。尾镜采用反射率为 95%、表面镀金铜反射镜,实验中 R 分别为 165, 300, 500, 1000 mm 及 ∞ (平面镜),由于尾部密封窗口片厚度 3 mm 及预留插入调 Q 开关空间,实验谐振腔尾镜安装在 $d \geq 10$ mm 的位置。谐振腔充入混合体积比 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{Xe})=1:1:2:0.25$ 的混合气体,谐振腔工作气压为 13 kPa,射频注入功率为 200 W。

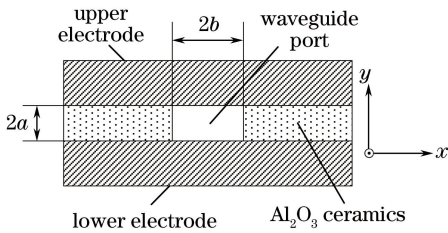


图 1 波导口截面图

Fig. 1 Sectional view of the waveguide port

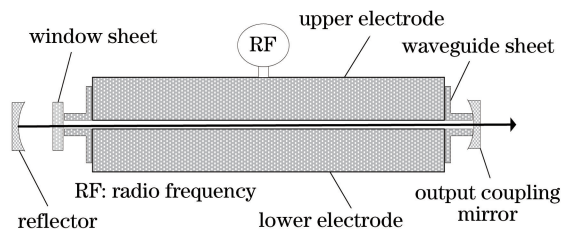


图 2 实验装置图

Fig. 2 Diagram of the experimental setup

3 实验结果

实验测得平面铜反射镜紧贴波导口时激光器的输出功率为 10.5 W,由于平面反射镜紧贴波导口时耦合损耗很小^[6],所以将此功率作为实验所选波导腔能够输出的最大功率 P_{max} 。测得不同曲率反射镜放在不同位置时激光器的输出激光功率,并与 P_{max} 对比计算了输出功率下降幅度与 R 和 d 的关系。

3.1 尾镜距离的影响

图 3 为 $R=300$ mm 和 500 mm 时,激光器输出功率 P_{out} 随 d 的变化。从图中可以看出,当 $R=300$ mm 时, P_{out} 随 d 的增加先减小,至 $d=150$ mm 的位置达到极小值 1.3 W,然后开始增大,在 $d=280$ mm 的位置

达到极大值 6.8 W, 比 P_{\max} 功率下降了 35.2%, 然后开始减小, 在 $d = 335$ mm 后减小为 0 W。当 $R = 500$ mm 时, P_{out} 随 d 的增加先减小, 在 $d = 100$ mm 时 $P_{\text{out}} = 0$ W, 然后自 $d = 390$ mm 开始产生激光输出并逐步增大, 在 $d = 490$ mm 的位置达到极大值 9.3 W, 比 P_{\max} 功率下降了 11.4%, 之后开始减小并在 $d = 560$ mm 时减小为 0 W。实验中, 考虑到谐振腔中要为 Q 开关的插入预留一定的空间, 参数 d 的最小值取 10 mm。实验结果说明, 当 R 一定时, P_{out} 会随着 d 的增大表现为先减小后增大再减小, 在 $d = R$ 的位置 P_{out} 达到极大值, 在此位置 P_{out} 与 P_{\max} 的差值比其他位置小。

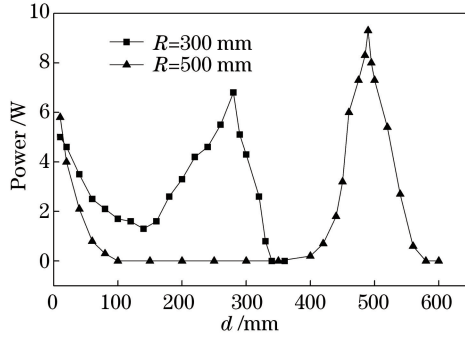


图 3 $R = 300$ mm 和 500 mm 时激光器输出功率随 d 的变化

Fig. 3 Output power of the laser versus d when R is 300 mm and 500 mm

3.2 尾镜曲率半径的影响

图 4 为 $d = 10$ mm、 $d = R$ 时 P_{out} 随 R 的变化。从图中可以看出, 对于 $m = 2$ 的矩形波导 CO_2 激光器, 当反射镜放置在距离波导口较近的位置 ($d = 10$ mm) 时, P_{out} 随着 R 的增大而不断增大。当 $R = 165$ mm 时, $P_{\text{out}} = 3.8$ W; 当 $R = 1$ m 时, $P_{\text{out}} = 6.8$ W。实验还测得当采用平面反射镜时 $P_{\text{out}} = 7.9$ W, 相比紧贴波导口时功率下降了 24.7%。在 $d = R$ 的极大值位置, P_{out} 同样随着 R 的增大而不断增大。当 $R = 165$ mm 时, $P_{\text{out}} = 3.5$ W; 当 $R = 300$ mm 时, $P_{\text{out}} = 6.8$ W; 当 $R = 500$ mm 时, $P_{\text{out}} = 9.3$ W, 比 P_{\max} 下降了 11.4%; 当 $R = 1$ m 时, $P_{\text{out}} = 9.6$ W, 比 P_{\max} 下降了 8.6%。说明对于 $m = 2$ 的矩形波导 CO_2 激光器, 在 $d = 10$ mm、 $d = R$ 两个位置, 当 R 不断增大时, P_{out} 会不断增大, 对于 $d = 10$ mm 的位置选择平面反射镜可获得最大功率输出; 对于 $d = R$ 的位置选择曲率半径为 500 mm 或 1 m 的反射镜均可实现较大功率激光输出, 且与平面反射镜紧贴波导口时的输出功率相差较小。

图 5 为 $R = 300, 500, 1000$ mm 时激光器输出功率随 d 的变化, d 的变化范围为 10~100 mm。从图中可以看出, 当 d 从 10 mm 变化到 100 mm 时, P_{out} 均随着距离 d 的增大而不断减小, 且 R 越大, 输出功率 P_{out} 随距离 d 的变化幅度越明显。实验结果说明, 当 $m = 2$ 时, 在与波导口小距离范围内 R 越大, 其远离波导口所引起的损耗对 d 的增加越敏感。

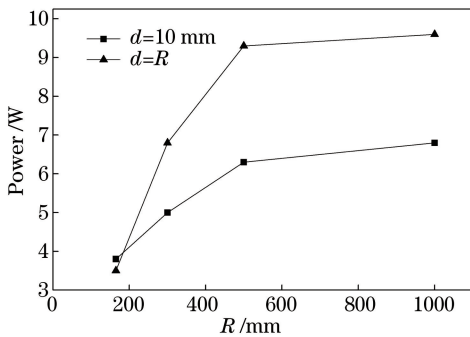


图 4 $d = 10$ mm、 $d = R$ 时激光器输出功率随 R 的变化

Fig. 4 Output power of the laser versus R when $d = 10$ mm and $d = R$

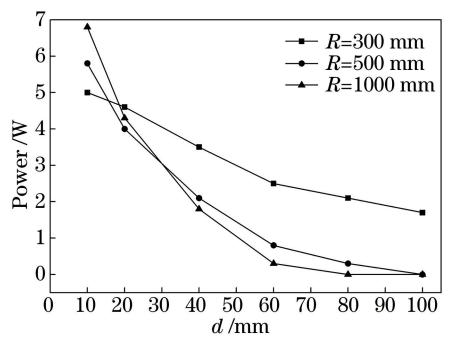


图 5 不同曲率反射镜激光器输出功率随 d 的变化

Fig. 5 Output power of the laser versus d when the reflector curvatures are different

4 分析与讨论

4.1 计算模型

理论计算模型如图 6 所示,波导中场自波导口 A_0 点出发,到达反射镜 A_1 点后经反射镜反射回 A_2 点。由于波导口尺寸相对反射镜尺寸较小,因此理论计算中假设反射镜无限大。

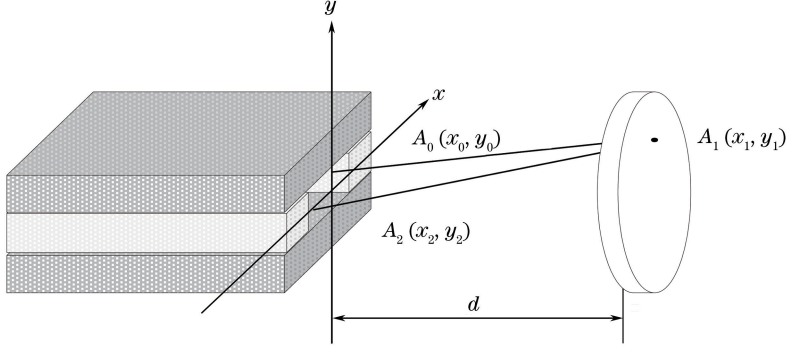


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Schematic of calculation model

矩形波导中 A_0 点场分布可表示为^[10-11]

$$E_{pq}(x_0, y_0) = (ab)^{(-1/2)} \begin{cases} \cos\left(\frac{p\pi x_0}{2a}\right) \cos\left(\frac{q\pi y_0}{2b}\right), & p \text{ and } q \text{ are odd numbers} \\ \sin\left(\frac{p\pi x_0}{2a}\right) \sin\left(\frac{q\pi y_0}{2b}\right), & p \text{ and } q \text{ are even numbers} \end{cases} \quad (1)$$

场从波导口任意点 A_0 处出发经自由空间传播到反射镜 A_1 点后经反射镜反射回到波导口 A_2 点,通过菲涅耳衍射积分理论, A_2 点场分布可表示为

$$E_{pq}(x_2, y_2) = - \left[\frac{1}{\lambda^2 d^2 (ab)^{1/2}} \right] \exp(2jkd) \exp\left[\frac{jk(x_2^2 + y_2^2)}{2d} \right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} dx_1 \exp\left(-\frac{jkx_1 x_2}{d} \right) \exp\left[\frac{jkx_1^2 (1-d/R)}{d} \right] \times \int_{-a}^a dx_0 \exp\left(-\frac{jkx_1 x_0}{d} \right) \exp\left(\frac{jkx_0^2}{2d} \right) \times \begin{cases} \cos(p\pi x_0/2a) \\ \sin(p\pi x_0/2a) \end{cases} \times \int_{-\infty}^{+\infty} dy_1 \exp\left(-\frac{jky_1 y_2}{d} \right) \exp\left[\frac{jky_1^2 (1-d/R)}{d} \right] \times \int_{-b}^b dy_0 \exp\left(-\frac{jky_1 y_0}{d} \right) \exp\left(\frac{jky_0^2}{2d} \right) \times \begin{cases} \cos(q\pi y_0/2b) \\ \sin(q\pi y_0/2b) \end{cases} \quad (2)$$

根据理论模型中反射镜无限大的假设,在 $d \neq R$ 和 $d = R$ 的情况下分别对(2)式进行简化。

当 $d \neq R$ 时,

$$E_{p'q'}(x_2, y_2) = \left[\frac{1}{2j\lambda d (1-d/R) (ab)^{1/2}} \right] \exp(2jkd) \exp\left[\frac{jk(x_2^2 + y_2^2)}{2d} \right] \times \int_{-a}^a \exp\left[-\frac{j\pi(x_2 - x_0)^2}{2\lambda d (1-d/R)} \right] \exp\left(\frac{j\pi x_0^2}{\lambda d} \right) \times \begin{cases} \cos(p\pi x_0/2a) \\ \sin(p\pi x_0/2a) \end{cases} dx_0 \times \int_{-b}^b \exp\left[-\frac{j\pi(y_2 - y_0)^2}{2\lambda d (1-d/R)} \right] \exp\left(\frac{j\pi y_0^2}{\lambda d} \right) \times \begin{cases} \cos(q\pi y_0/2b) \\ \sin(q\pi y_0/2b) \end{cases} dy_0 \quad (3)$$

当 $d = R$ 时,

$$E_{p'q'}(x_2, y_2) = (ab)^{-1/2} \exp(2jkd) \exp\left[\frac{jk(x_2^2 + y_2^2)}{d} \right] \begin{cases} \cos(p\pi x_2/2a) \cos(q\pi y_2/2b) \\ \sin(p\pi x_2/2a) \sin(q\pi y_2/2b) \end{cases} \quad (4)$$

波导口 A_0 点的模为 EH_{pq} 经反射镜返回到波导口 A_2 处模为 $EH_{p'q'}$, 定义 A_2 点模 $EH_{p'q'}$ 投影到 A_0 点模 EH_{pq} 的系数为耦合效率 $C_{pq}^{p'q'}$, 当 $C_{pq}^{p'q'}$ 等于 1 即 EH_{pq} 与 $EH_{p'q'}$ 相同时耦合效率最高。为求解耦合系数, 将(4)式在波导模 EH_{pq} 上投影得到展开系数 $\chi_{pq}^{p'q'}$ 为^[11]

$$\begin{aligned} \chi_{pq}^{p'q'} = & \int_{-a}^a \int_{-b}^b E_{pq}(x_0, y_0) E_{p'q'}^*(x_2, y_2) dx_2 dy_2 = \left[\frac{ma^2}{2j\left(1 - \frac{d}{R}\right)\lambda d} \right] \exp(2jkd) \times \\ & \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 dX dX_2 \exp\left[\frac{j\pi a^2}{\lambda d} (X_0^2 + X_2^2) \right] \times \exp\left[-\frac{j\pi a^2}{2\left(1 - \frac{d}{R}\right)\lambda d} (X_0 - X_2)^2 \right] \times \\ & \begin{cases} \cos\left(\frac{1}{2}p\pi X_0\right) \cos\left(\frac{1}{2}p\pi X_2\right) \\ \sin\left(\frac{1}{2}p\pi X_0\right) \sin\left(\frac{1}{2}p\pi X_2\right) \end{cases} \times \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 dY dY_2 \exp\left[\frac{j\pi m^2 a^2}{\lambda d} (Y_0^2 + Y_2^2) \right] \times \\ & \exp\left[-\frac{j\pi m^2 a^2}{2\left(1 - \frac{d}{R}\right)\lambda d} (Y_0 - Y_2)^2 \right] \times \begin{cases} \cos\left(\frac{1}{2}q\pi Y_0\right) \cos\left(\frac{1}{2}q\pi Y_2\right) \\ \sin\left(\frac{1}{2}q\pi Y_0\right) \sin\left(\frac{1}{2}q\pi Y_2\right) \end{cases}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $X_0 = x_0/a, X_2 = x_2/a, Y_0 = y_0/b, Y_2 = y_2/b$, 则耦合效率为

$$C_{pq}^{p'q'} = |\chi_{pq}^{p'q'}|^2. \quad (6)$$

4.2 $m=2$ 时的耦合效率

采用 Matlab 数学软件对(5)式进行数值积分,通过(6)式可计算得到耦合效率与 R, d 的关系。由于 EH_{11} 模在波导整个横截面上没有节线,在波导轴线上强度最大,具有线偏振特性,与稳定腔的基横模 (TEM_{00}) 类似,是矩形波导最低阶损耗模,也是最重要的模式^[12],因此主要计算 EH_{11} 模耦合效率与 R, d 的关系。

图 7 为波导纵横比 $m=2$ 时矩形波导谐振腔 EH_{11} 模耦合效率随 R 和 d 的变化,从图中可以看出,当 R 一定时,耦合效率随着 d 的增加先减小,在 $d=f=R/2$ 的位置达到极小值后开始增大,在 $d=R$ 的位置达到极大值后开始不断减小至 0,与实验所得 R 一定时激光器输出随 d 的变化一致,对比不同曲率反射镜耦合效率可以看出当 d 较小时, R 越大耦合效率越高。在 $d=f=R/2$ 耦合效率极小值的位置, R 越大,该极小点对应的耦合效率越低,当 $R=1 \text{ m}, d=10 \text{ mm}$ 时耦合效率减小为 23.9%,而此时实验中激光器已无激光输出。在 $d=R$ 耦合效率极大值的位置, R 越大,该极大值点对应的耦合效率越高,当 $R=1 \text{ m}, d=10 \text{ mm}$ 时,耦合效率可达 93.1%,实验中此位置也为输出功率的极大值,输出功率达到 9.6 W。在耦合效率随 d 的变化过程中可以看出,反射镜曲率半径 R 越大,耦合效率对距离的变化越敏感。分析可得,耦合效率随 R 和 d 的变化趋势可以很好地反映矩形波导 CO_2 激光器输出功率随 R 和 d 的变化趋势,在 $d=10 \text{ mm}$ 的位置,理论计算耦合效率越高时,对应的激光器输出功率越高,在 $d=R$ 的位置,耦合效率和激光器输出功率均达到极大值点,当耦合效率趋近于 1 时,激光器输出功率也趋近于平面反射镜紧贴波导口时激光器的输出功率。

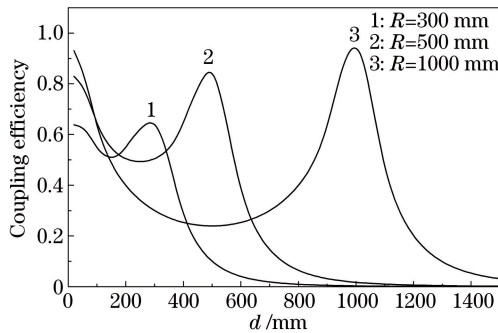


图 7 耦合效率随 R 和 d 的变化

Fig. 7 Variation of coupling efficiency with R and d

表 1 为激光器输出功率为零的临界位置处谐振腔参数对应的耦合效率。结合第 3 节中的实验结果分析,当耦合效率大于 60.7% 时,激光器有激光输出,耦合效率约小于 60% 时激光器输出功率为 0。理论与实

验结果的结合分析表明,当耦合效率约大于 80% 时,激光器输出功率大于等于平面反射镜紧贴波导口时输出功率的 80%。因此,在半外腔激光器谐振腔参数选择过程中,要实现出光,所设计谐振腔参数对应的耦合效率必须大于 60%,为获得高功率激光输出,所设计谐振腔参数对应的耦合效率必须大于 80%。

表 1 输出功率为零的临界位置处谐振腔的耦合效率

Table 1 Coupling efficiency of resonant cavity at the critical position with output power of 0 W

R / mm	300	500	500	500	Average
d / mm	335	100	390	560	
Coupling efficiency / %	57.2	64.5	62.0	59.4	60.7

4.3 高纵横比耦合效率

图 8 为 EH_{11} 模耦合效率随波导纵横比 m 的变化。从图中可以看出,当 $d=10 \text{ mm}$ 、 $R=\infty$ 时,耦合效率随 m 的增大有极小幅度的增大, $m=1\sim 4$ 时,耦合效率均大于等于 95%,因此 $d=10 \text{ mm}$ 的位置适合波导纵横较大的矩形波导 CO_2 激光器作外腔搭建。当选择 $d=R$ 的极大值位置时,可以看出,当 R 一定时耦合效率随 m 的增大不断减小,当 m 一定时,耦合效率随 R 的增大不断增大,即所选激光器波导纵横比 m 越大,要想实现较高的耦合效率所需的反射镜曲率半径就越大。对于 $m=4$ 的矩形波导 CO_2 激光器,在 $d=R$ 的极大值点,当反射镜曲率半径为 2 m 时,计算可得 EH_{11} 模耦合效率达到 84.8%。

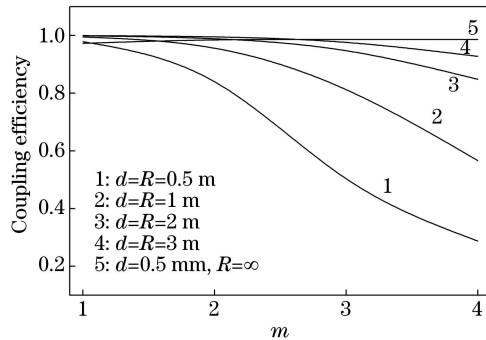


图 8 耦合效率随 m 的变化
Fig. 8 Coupling efficiency versus m

5 结 论

实验研究了波导纵横比 $m=2$ 的矩形波导 CO_2 激光器输出功率 P_{out} 与谐振腔全反镜曲率半径 R 及全反镜距波导口的距离 d 的关系。对比平面反射镜紧贴波导口时激光器的输出功率,获得了反射镜远离波导口所引起的损耗与 R 和 d 的关系。基于菲涅耳衍射积分理论采用 Matlab 数学软件理论计算了 $m=2$ 时 EH_{11} 耦合效率与 R 和 d 之间的关系。理论与实验结果对比可以得到以下结论。

- 1) 在 $d=R$ 的位置,反射镜曲率越大耦合效率越高。当 $R=1 \text{ m}$ 时耦合效率已达 95.6%,放电宽度为 3 mm 的矩形波导 CO_2 激光器可获得 9.6 W 激光输出,比平面反射镜紧贴波导口的输出功率仅下降了 8.6%。
- 2) 当谐振腔耦合效率小于 60% 时,激光器输出功率为 0 W;当耦合效率大于 80% 时,激光器可获得平面反射镜紧贴波导口时 80% 的输出功率。在 $d=10 \text{ mm}$ 的位置,对于不同波导纵横比的激光器,选择平面反射镜均可获得 90% 以上的耦合效率,在该谐振腔参数下放电宽度为 3 mm 的矩形波导 CO_2 激光器可获得 7.9 W 激光输出。
- 3) 对于 $m=4$ 的高纵横比矩形波导 CO_2 激光器,通过理论计算得到在 $d=10 \text{ mm}$ 及 $d=R \geq 2 \text{ m}$ 时均可获得满足高功率输出的 80% 以上的耦合效率,且在这两个位置耦合效率均随反射镜曲率半径的增大而增大。

参 考 文 献

[1] Li Zhibo. The experimental research of minitype CO_2 differential absorption lidar system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 1-5.
李志博. 小型 CO_2 差分吸收激光雷达系统的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1-5.

- [2] Piltingsrud H V. CO₂ laser for lidar applications, producing two narrowly spaced independently wavelength-selectable Q-switched output pulses[J]. Applied Optics, 1991, 30(27): 3952-3963.
- [3] Wang Wei, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.* Influence of resonator mirror surfaces on output mode of radio frequency slab CO₂ lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0402004.
王 炜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 腔镜面型对射频板条 CO₂ 激光器输出模式的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0402004.
- [4] Yang Weihong, Yuan Jinkun, Wang Du, *et al.* Study on electrode waveguide dielectric film for high power radio frequency slab CO₂ laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0107001.
杨卫红, 袁金坤, 王 度, 等. 大功率射频板条 CO₂ 激光器电极波导介质膜研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0107001.
- [5] Xin Jianguo, Wei Guanghui. Technology development and prospects for RF transversely excited diffusively cooled CO₂ lasers[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(5): 371-376.
辛建国, 魏光辉. 射频横向激励扩散型冷却 CO₂ 激光器技术的进展与前景[J]. 中国激光, 1994, 21(5): 371-376.
- [6] Abrams R L. Coupling losses in hollow waveguide laser resonators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(11): 838-843.
- [7] Marcus S, Carter G M. Electrooptically Q-switched CO₂ waveguide laser[J]. Applied Optics, 1979, 18(16): 2824-2826.
- [8] Wang Qi, Tian Zhaoshuo, Wang Yusan, *et al.* Electrooptically Q-switched RF excited CO₂ waveguide laser [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(2): 97-100.
王 骐, 田兆硕, 王雨三, 等. 电光调 Q 射频激励波导 CO₂ 激光器[J]. 中国激光, 2000, 27(2): 97-100.
- [9] Zhou Dingfu, Jiang Dong, Hou Tianjin, *et al.* The study on the E-O Q-switch of RF waveguide CO₂ laser[J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 270-272.
周鼎富, 江 东, 侯天晋, 等. RF 激励波导 CO₂ 激光器电光调 Q 实验研究[J]. 激光技术, 2002, 26(4): 270-272.
- [10] Laakmann K D, Steier W H. Waveguides: characteristic modes of hollow rectangular dielectric waveguides[J]. Applied Optics, 1976, 15(5): 1334-1340.
- [11] Wang Xinbing, Xu Qiyang, Xie Mingjie, *et al.* Coupling losses and mode properties of planar waveguide resonators[J]. Acta Optica Sinica, 1995, (11): 1515-1519.
王新兵, 徐启阳, 谢明杰, 等. 平板波导谐振腔的耦合损失和模式特征[J]. 光学学报, 1995, (11): 1515-1519.
- [12] Degnan J J. The waveguide laser: a review[J]. Applied Physics, 1976, 11(1): 1-33.